Оригинальная статья

УДК 622.23.01: 553.061.4: 620.173.24 © М.А. Черевко✉[1], А.В. Деньгаев[2], О.В. Деньгаева[3], Д.С. Корельский[4], 2025

[1] ООО «Нефтесервисные решения», 190031, г. Санкт-Петербург, Россия
[2] ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», 119991, г. Москва, Россия
[3] ПАО «Газпромнефть», 190000, Санкт-Петербург, Россия
[4] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия,
✉ e-mail: Cherevko.MiA@gazprom-neft.ru

Original Paper

UDC 622.23.01: 553.061.4: 620.173.24 © M.A. Cherevko✉[1], A.V. Dengaev[2], O.V. Dengaeva[3], D.S. Korelskiy[4], 2025

[1] Nefteservisnye Resheniya LLC, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2] Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991, Russian Federation
[3] Gazprom Neft PJSC, Saint-Petersburg,190000, Russian Federation
[4] Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation
✉ e-mail: Cherevko.MiA@gazprom-neft.ru

Теоретические основы критериев разрушения горных пород с учетом структурных дефектов

Theoretical basis of rock failure criteria with account of structural defects

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-11-121-124

Разработка новых теоретических и технико-технологических решений на базе детальных исследований физической сущности процессов разрушения горных пород позволяет установить взаимосвязь концентрации напряжений раскалывания пород с их структурой и систематизировать эти данные. Изучение влияния структурных дефектов на критерии разрушения горных пород является целью настоящего исследования. При исследовании критерия разрушения учитывались сцепление, угол внутреннего трения, нарушенность и другие структурные факторы горных пород и их изменения в результате перераспределения напряжений и напряжено-деформированного состояния. Наличие уравнения состояния породообразующих минералов с учетом их структуры позволяет прогнозировать во времени устойчивость массива при перераспределении напряжений и изменении его напряженно-деформированного состояния.

***Ключевые слова**: дефект, горная порода, напряжение, напряженно-деформированное состояние, прочность, разрушение, структура, твердое тело.*

Для цитирования: Теоретические основы критериев разрушения горных пород с учетом структурных дефектов / М.А. Черевко, А.В. Деньгаев, О.В. Деньгаева и др. // Уголь. 2025;(11):121-124. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-121-124.

Abstract

Development of new theoretical as well as design and engineering solutions based on detailed studies of the physical nature of the rock failure processes allows establishing the relationship between the concentration of rock breaking stresses and their structure along with systematizing these data. The aim of this study is to investigate the effects of structural defects on the rock

ЧЕРЕВКО М.А.
Канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Нефтесервисные решения», 190031, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Cherevko.MiA@gazprom-neft.ru

ДЕНЬГАЕВ А.В.
Канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», 119991, г. Москва, Россия, e-mail: dengaev.a@gubkin.ru

ДЕНЬГАЕВА О.В.
Руководитель департамента по технологическому развитию ПАО «Газпромнефть», 190000, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: olga.dengaeva@gmail.com

КОРЕЛЬСКИЙ Д.С.
Канд. техн. наук, кафедра геоэкологии Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Korelskiy_DS@pers.spmi.ru

failure criteria. Studies of the failure criteria involved consideration of cohesion, internal friction angle, discontinuities, and other structural factors of rocks and their changes as the result of stress redistribution and the stress-and-strain state. Availability of the equation that describes the state of the rock-forming minerals with account of their structure makes it possible to predict the stability of the rock mass over time during stress redistribution and changes in its stress-and-strain state.

Keywords

Defect, rock, stress, stress-and-strain state, strength, failure, structure, solid body.

For citation

Cherevko M.A., Dengaev A.V., Dengaeva O.V., Korelskiy D.S. Theoretical basis of rock failure criteria with account of structural defects. *Ugol'*. 2025;(11):121-124. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-121-124.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация темпов освоения природных ресурсов, в том числе и ресурсов недр [1, 2], привела к тому, что человечество столкнулось с неизвестными ранее проблемами, которые по своим формам воздействия и характеру проявления выходят за пределы ранее исследованных [3, 4]. К числу таких воздействий можно отнести горно-тектонические удары [7, 8] и техногенные землетрясения, [5, 6] нарушение водозащитной толщи [7] и прорыв воды в подземное пространство [7, 8].

В ходе ведения горных работ происходит воздействие на горные выработки [9, 10], а также здания и сооружения, находящиеся на поверхности [11, 12, 13]. Незначительная амплитуда колебаний не исключает влияния их на разрушение подработанного массива, развитие трещин и формирование иных деформационных процессов, возникающих в массиве [14, 15].

Как правило, структурный анализ породного массива и руды не принимают во внимание при расчете эксплуатационной надежности горных выработок, длительности существования охранных целиков и минимизации нарушенности подработанного массива [16]. Строгое понимание сущности разрушения горных пород позволит устанавливать более точные краевые значения при компьютерном моделировании процессов, происходящих при извлечении полезного ископаемого из недр.

Исходя из изложенного выше, изучение влияния структурных дефектов, возникающих в ходе эксплуатации месторождения, на критерии разрушения горных пород является весьма актуальной задачей.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Существующие теории прочности (Мора-Кулона; Модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil); модифицированная модель Cam Clay; модель Друкера-Прагера и др.) учитывают сцепление, угол внутреннего трения и энергию разрушения, однако не в полной мере описывают влияние дефектов структуры [17, 18]. В данной статье рассмотрены модификации критериев разрушения, где дополнительно, помимо микроструктурных особенностей минералов, учитываются макроструктурные.

Поверхность разрушения породообразующих минералов с конкретными размерами микроплощадок сдвига и отрыва, сформированная нагрузками разрушения, является основой механизмов разрушения твердых тел и должна играть существенную роль в критериях разрушения образцов или массива с известными значениями модуля упругости горных пород [19, 20].

ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ

Как известно, пять основных теорий разрушения горных пород на основе их прочности базируются на показателях напряжений ($\sigma_п$, ε, τ, $\tau - \sigma_п$) и работе разрушения образцов горных пород A по их предельным состояниям [21].

В данном исследовании все эти критерии рассматриваются как составные части показателя прочности горных пород на основе их структуры. Все эти критерии рассматриваются как составные части показателей прочности горных пород на основе их структуры.

В работе [16] в основе экспериментальной и теоретической оценки прочности твердого тела получено уравнение состояния породообразующих минералов с учетом их структуры. Уравнение позволяет представить обобщенный критерий разрушения твердого тела с учетом его структуры. Однако полученное уравнение учитывает только точечные дефекты, что не позволяет в полной мере оценить и спрогнозировать изменение во времени напряженно-деформированного состояния массива.

Учет масштабных (линейных, поверхностных и объемных) структурных дефектов горных пород позволит более точно определять критерии разрушения и прогнозировать устойчивость массива во времени.

Усредненное значение степени разрушения породы $c = 0{,}1387$ соответствует $\sigma_р = 0{,}7240$ Мпа. При обозначении $10^4 f_р = A$ критерий A определится как:

$$A = \left(0{,}7004\ \ 0{,}7240/0{,}1E2\right) = \left(\sigma_р^2\right)\Big/\left(0{,}2E\right), \qquad (1)$$

где цифра 0,2 в знаменателе дроби означает две половины разрушенного образца.

Модификациями уравнения (1) могут быть следующие критерии разрушения:

$$A = \frac{10\sigma_{р.}\sigma_{раск.}}{2E} = \frac{\sigma_{сж.}\sigma_{раск.}}{2E} = \frac{\varepsilon\sigma_{раск.}}{2}, \qquad (2)$$

где $\sigma_{сж.}$ – концентрация разрушающих напряжений при сжатии; E – величина относительной деформации разрушенного образца. При известных E и $\sigma_р$ можно определить A_1 и ε.

Так как c – показатель разрушения структуры ступенькой с составляющими x и λ, пропорциональными касательным и нормальным напряжениям, то, с одной стороны, $c = \frac{x}{\lambda} = tg\omega$, а с другой, c – коэффициент соотношения напряжений в формуле $c = \tau/\sigma_р$, то есть известные значения $c = 0{,}1387$ и $\sigma_р = 0{,}7240$ МПа позволяют определить $\tau = 0{,}7004 \cdot 0{,}1387 = 0{,}1$ МПа. Из этого видно, что $tg\omega$ представляет собой своего рода угол внутреннего трения (в теории Мора), а c – сцепление структуры.

Приведенные модифицированные уравнения, с учетом масштабных структурных дефектов и усредненных критериев разрушения, позволяют учитывать макроструктурные характеристики при анализе прочности горных пород.

Таким образом, становится возможным определять не только макроскопические значения этих характеристик, но и производить локальные измерения указанных выше признаков, устранив при этом ошибки усреднения и исключив случайности. Следующими модификациями обобщенного критерия разрушения образцов при раскалывании с учетом касательных и нормальных напряжений могут быть:

$$A_2 = \sigma_{\text{раск.}} \Big/ 0,2E_c = \frac{\sigma_{\text{раск.}}}{0,2E\tau/\sigma_{\text{р}}} = \frac{\sigma_{\text{р.}}\sigma_{\text{раск.}}}{0,2E\tau}, \text{ при } \tau = 1; \quad (3)$$

$$A_3 = \frac{\sigma_{\text{р.}}\sigma_{\text{раск.}}}{0,2E} = \frac{10\sigma_{\text{р.}}\sigma_{\text{раск.}}}{2E} = \frac{\sigma_{\text{сж.}}\sigma_{\text{раск.}}}{2E} = \frac{\varepsilon\sigma_{\text{раск.}}}{2},$$

при $\nu = 1$; (4)

$$A_4 = \frac{\sigma_{\text{р.}}\sigma_{\text{раск.}}}{2E\tau}, \text{ при } = 0,1;\ A_5 = \frac{\sigma_{\text{р.}}\sigma_{\text{раск.}}}{0,2E0,1} = \frac{\sigma_{\text{сж.}}\sigma_{\text{раск.}}}{0,2E}. \quad (5)$$

Твердые тела без элементов структуры x и λ (аморфные) можно оценить критериями:

$A_6 = \frac{\sigma^2_{\text{раск}}}{0,2E}$ – при раскалывании,

$A_7 = \frac{\sigma^2_{\text{р.}}}{0,2E}$ – при растяжении.

ВЫВОДЫ

Теоретический анализ показывает, что учет масштабных структурных дефектов горных пород позволяет более точно определять критерии разрушения и прогнозировать устойчивость массива во времени. Разработанные критерии могут использоваться при компьютерном моделировании процессов разрушения и проектировании горнотехнических сооружений.

Дальнейшим направлением исследования видится проверка предлагаемых теоретических основ оценки критериев разрушения горных пород с учетом масштабных структурных дефектов путем лабораторно-экспериментального анализа.

Список литературы • References

1. Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М., Горелкина Е.И. Классификация георесурсов в парадигме их комплексного освоения // Горная промышленность. 2024;(6):140-143. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-140-143.
   Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M., Gorelkina E.I. Increasing Classification of georesources in the paradigm of their integrated development. *Russian Mining Industry.* 2024;(6):140-143. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-140-143.
2. Nikitin V.I., Nechaeva O.A., Zhivaeva V.V. Software for calculating the volume of drilling fluid filtrate penetrating into the reservoir during well completion. *Oil Industry.* 2022;(8):126-128. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-8-126-128.
3. Исследование механических характеристик закладочного композита, созданного на основе отходов угледобычи / Ч.Б. Конгар-Сюрюн, А.М. Хайрутдинов, А.В. Деньгаев и др. // Уголь. 2025. № 3. С. 145-148. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-145-148.
   Kongar-Syuryun Ch.B., Khayrutdinov A.M., Dengaev A.V., Abdulrahman B. Research on the mechanical properties of backfill composite made from coal mining waste. *Ugol'.* 2025;(3):145-148. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025- 3-145-148.
4. Zakirova G.S., Pshenin V.V., Gustov A.A. Compensation of Temperature Deformations of Gas Pipelines. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2025;38(7):1699-1707. DOI: 10.5829/IJE.2025.38.07A.20.
5. Babyr N.V. Topical Themes and New Trends in Mining Industry: Scientometric Analysis and Research Visualization. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2024;37(2):439-451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.
6. Методические основы синтеза моделей развития горных работ для управления процессом воспроизводства очистного фронта угольных шахт / Ю.Н. Кузнецов, Д.А. Стадник, Н.М. Стадник и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 4. С. 685-694. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-685-694.
   Kuznetsov Yu.N., Stadnik D.A., Stadnik N.M. Shadyzheva E.B. Methodological Bases for Synthesis Operation Models for Control of the Reproduction Process of the Advancing Faces of Coal Mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(4):685-694. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-685-694
7. Odintsov E.E., Gusev V.N. Rock Mass Condition Control by the Method of Predicting of Water-Conducting Fracture Zone Parameters for the Deposits of Polymetallic Ores. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects.* 2026;39(06):1326-1333. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.02.
8. Nikitin V.I., Nechaeva O.A., Mozgovoi G.S. Analysis of the results of the experiment to determine the saturation of the filtrate of drilling fluid of the core sample. AIP Conf. Proc. 29 October 2021;2410(1):020014. https://doi.org/10.1063/5.0067566.
9. Моделирование реологических процессов деформирования несущих элементов камерной системы разработки для условий Верхнекамского месторождения калийных солей / Е.Р. Ковальский, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Ю.Г. Сиренко и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3. С. 1017-1030. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030.
   Kovalskiy E.R., Kongar-Syuryun Ch.B., Sirenko Yu.G., Mironov N.A. Modeling of rheological deformation processes for room and pillar mining at the Verkhnekamsk potash salt deposit. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2024;16(3):1017-1030. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030.
10. Nikitin V.I., Agrelkina M.M. Justification for the Selection of a Relative Permeability Model in the Task of Predicting Drilling Fluid Filtrate Invasion into the Formation. *International Journal of Engineering*. 2025;38(10): 2312-2320. DOI: 10.5829/ije.2025.38.10a.08.
11. Конгар-Сюрюн Ч.Б. Влияние шахтной воды на прочностные характеристики искусственного массива, созданного на основе техногенных отходов // Уголь. 2024. № 12. С. 75-78. DOI: 10.18796/0041- 5790-2024-12-75-78.
    Kongar-Syuryun Ch.B. Influence of mine water on the strength of artificial mass based on industrial waste. *Ugol'.* 2024;(12):75-78. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.

12. Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Создание закладочного композита на основе отходов угольной промышленности // Уголь. 2024. № 10. С. 24-27. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-24-27.
Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Creation of a backfill composite based on coal industry waste. *Ugol'.* 2024;(10):24-27. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-24-27.
13. Методические основы имплицитного моделирования месторождений твердых полезных ископаемых при автоматизированном проектировании / Д.А. Стадник, Н.М. Стадник, А.Г. Жилин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 5-1. С. 185-197. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_185.
Stadnik D.A., Stadnik N.M., Zhilin A.G., Lopushnyak E.V. Methodological framework for implicit modeling of solid mineral deposits in automated design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5-1):185-197. (In Russ). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_185.
14. Nikitin V.I., Zhivaeva V.V., Mozgovoy G.S. Calculation of Saturation and Depth of Filtrate Penetration in the Primary Opening. Proceedings of the International Conference Engineering Innovations and Sustainable Development. Cham: Springer. 2022;210. DOI: 10.1007/978-3-030-90843-0-30.
15. Pshenin V.V. Determination of Parameters of Rational Placement of Oil and Petroleum Product Vapor Recovery Unit. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025;38(2):362-367. DOI: 10.5829/ije.2025.38.02b.10.
16. Исследование влияния структурных дефектов на прочность горных пород / Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Е.С. Сазанкова, М.А. Черевко и др. // Уголь. 2025. № 5. С. 97-100. DOI: 10.18796/0041- 5790-2025-5-97-100.
Kongar-Syuryun Ch.B., Sazankova E.S., Cherevko M.A., Dengaev A.V. A study of the structural defects impact on the strength of rocks. *Ugol'.* 2025;(5):97-100. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-97-100.
17. Skorobogatov A.A., Pshenin V.V., Tsvetkova C.P., Borisov R.A. Multiphase Oil-water Flow in Horizontal and Inclined Pipelines. Effect of Flow Velocity on Flow Patterns. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025;38(8):1820-1830. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.08.
18. Конгар-Сюрюн Ч.Б. Техногенные отходы в составе закладочного композита – парадигма экологической и технологической безопасности освоения месторождения // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 3. С. 73-78. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-73-78.
Kongar-Syuryun Ch.B. Industrial Waste in Backfill Composite – the Paradigm of Environmental and Process Safety during Field Development. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2025;(3):73-78. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-73-78.
19. Khayrutdinov M.M., Aleksakhin A.V., Kibuk T.N., Korshunova L.N., Lozinskaya M.A., Legoshina O.Y., Skryabin O.O., Kruzhkova G.V. Technogenic Waste in Backfill Composite Is a Paradigm of Circular Economy. *Mining*. 2025;(5):57. DOI: 10.3390/mining5030057.
20. Nikitin V.I., Zhivaeva V.V., Nechaeva O.A., Kamaeva E.A. Influence of capillary pressure on the restoration of the bottomhole zone permeability at the filtrate-oil interfacial phase. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. 2019:558-562. DOI: 10.1201/9781003014638-12.
21. Gusev V.N., Odintsov E.E., Zherlygina E.S. Calculation of Displacements and Deformations in Rock Mass with Regard to Field Data. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(4):18-25. DOI: 10.17580/gzh.2025.04.03.

Authors Information
Cherevko M.A. – PhD (Engineering), General Director, Nefteservisnye Resheniya LLC, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: Cherevko.MiA@gazprom-neft.ru
Dengaev A.V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: dengaev.a@gubkin.ru
Dengaeva O.V. – Head of the Technological Development Department, Gazprom Neft PJSC, Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, e-mail: olga.dengaeva@gmail.com
Korelskiy D.S. – PhD (Engineering), Associate Professor, of the Mining Department, Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: Korelskiy_DS@pers.spmi.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 9.10.2025
Поступила после рецензирования: 18.10.2025
Принята к публикации: 30.10.2025

Paper info
Received October 9, 2025
Reviewed October 18, 2025
Accepted October 30, 2025